

W1118 EF

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 07-074699

(43)Date of publication of application : 17.03.1995

(51)Int.Cl.

H04B 10/02

H04B 10/18

(21)Application number : 05-219538

(71)Applicant : HITACHI LTD

(22)Date of filing : 03.09.1993

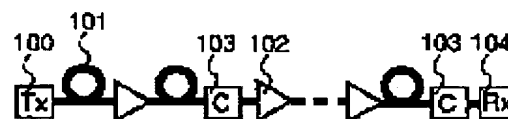
(72)Inventor : KIKUCHI NOBUHIKO
SASAKI SHINYA

(54) OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM

(57)Abstract:

PURPOSE: To provide the dispersion compensation system taking the effect of a self-phase modulation effect(SPM) into account in the optical relay transmission employing an optical amplifier.

CONSTITUTION: The effect of waveform deterioration by the SPM is cancelled by setting a compensation quantity C of a dispersion compensation device 103 to nearly 50% of a total dispersion quantity of an optical fiber transmission line and even when the optical intensity is fluctuated, a received waveform is almost unchanged. Furthermore, when plural dispersion compensation devices are in use, number of the dispersion compensation devices is optimized by decreasing the interval of the arrangement around a reception end. Moreover, the minimum transmission distance of the transmission system is extended by executing the compensation of the dispersion so that an expected total dispersion of the transmission line is an abnormal dispersion in the transmission line where the dispersion in the optical fiber is dispersed positively or negatively.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 09.09.1999

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3269713

[Date of registration] 18.01.2002

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平7-74699

(43) 公開日 平成7年(1995)3月17日

(51) Int.Cl. ⁸	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 4 B 10/02 10/18		9372-5K	H 0 4 B 9/ 00	M

審査請求 未請求 請求項の数14 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願平5-219538

(22) 出願日 平成5年(1993)9月3日

(71) 出願人 000005108

株式会社日立製作所

東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72) 発明者 菊池 信彦

東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280番地

株式会社日立製作所中央研究所内

(72) 発明者 佐々木 ▲慎▼也

東京都国分寺市東恋ヶ窪1丁目280番地

株式会社日立製作所中央研究所内

(74) 代理人 弁理士 小川 勝男

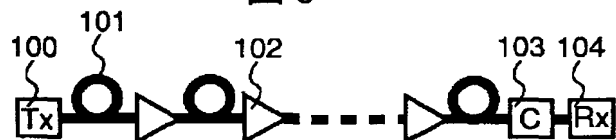
(54) 【発明の名称】 光伝送システム

(57) 【要約】

【目的】 光アンプを用いた光中継伝送における自己位相変調効果 (S P M) の影響を考慮した分散補償方式を提供する。

【構成】 分散補償器 1 0 3 の補償量 C を光ファイバ伝送路の総分散量の約 5 0 % に設定することにより S P M による波形劣化の影響をキャンセルし、光強度が変動しても受信波形がほとんど変化しないようにする。また複数の分散補償器を用いる場合、受信端付近の配置間隔を小さくすることにより、分散補償器の個数を最適化する。さらに光ファイバの分散値が正負にばらつきを持つ伝送路において、伝送路の総分散値の期待値が異常分散となるように分散補償を実施することにより、伝送系の最低伝送距離を拡大する。

図 3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】強度変調された光信号を送出する光送信機、光ファイバ伝送路、光受信機、および少なくとも一つ以上の光分散補償器を含む総伝送距離 L の光伝送システムにおいて、該光送信機から距離 z の点 Z における光ファイバ中の光強度を $P(z)$ 、点 Z から該光受信機までの分散量（光分散補償器の分散量を含む）を $D(z)$ とするとき、積 $P(z) \cdot D(z)$ を $z = 0$ から L まで積分した値が略、零となるように、光分散補償器の位置及び、分散量を設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 2】強度変調された光信号を送出する光送信機、光ファイバ伝送路、光受信機、および少なくとも一つ以上の光分散補償器を含む総伝送距離 L の光伝送システムにおいて、該光送信機からの距離 z の点 Z における光ファイバ中の光強度を $P(z)$ 、送信側から i 番目の光分散補償器の直後の点を Z_i 、点 Z から Z_i 間の分散量（光分散補償器の分散量を含む）を $D_i(z)$ とするとき、積 $P(z) \cdot D_i(z)$ を $z = 0$ から Z_i まで積分した値がすべての i について略、零となるように、各光分散補償器の位置及び、分散量を設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 3】強度変調された光信号を送出する光送信機、光ファイバ伝送路、光アンプを用いた 0 個以上の光中継器、光受信機、および該光受信機の前に配置された光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、該分散補償器の分散量 C を伝送路の分散量 B の略 $\{1 / (aL) - (N+1) / (2N)\}$ 倍（ただし a は光ファイバの損失係数、 L は総伝送距離、 N は中継区間数）となるように設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 4】強度変調された光信号を送出する光送信機、光ファイバ伝送路、光受信機、および少なくとも 2 つ以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、受信端付近の分散補償器の配置間隔を、送信端付近の配置間隔より小さくすることを特徴とした光伝送システム。

【請求項 5】強度変調された光信号を送出する光送信機、光ファイバ伝送路、光受信機、および少なくとも 2 つ以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、各分散補償器に入力される光波形の波形劣化量（アイ開口もしくは波形幅）が略一致するような位置に、分散補償器を配置することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 6】強度変調された光信号を送出する光送信機、光ファイバ伝送路、光受信機、および少なくとも 2 つ以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、該光送信機と 1 番目の分散補償器の間隔を l_1 とするとき、 i 番目と $i+1$ 番目の分散補償器間隔 l_i を l_1 の略 $\sqrt{i} - \sqrt{(i-1)}$ 倍に設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 7】強度変調された光信号を送出する光送信機、光ファイバ伝送路、光受信機、少なくとも送信機の

直後、および該光受信機の直前に配置された 2 つ以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、該光送信機直後の第一の分散補償器により光波形の幅を送信光波形の幅に比べ十分に拡大した後に該光ファイバ伝送路を伝送し、該光受信機直前の第二の分散補償器により、該第一の分散補償器の分散量もしくは、該第一の分散補償器の分散量と該光ファイバ伝送路の分散量を補償して受信することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 8】各区間の分散量が正負、もしくは負（正常分散）の範囲で統計的なばらつきを持つ一つ以上の光ファイバ伝送区間と、光アンプを用いた 0 個以上の光中継器と、強度変調光を送出する光送信機と、光受信機および、少なくとも一つ以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、該光分散補償器を含めた伝送路の総分散量の期待値が正の分散（異常分散）となるように分散補償量を設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 9】各区間の分散量が統計的なばらつきを持ち、かつその最大／最小値が定められた一つ以上の光ファイバ伝送区間と、光アンプを用いた 0 個以上の光中継器と、強度変調光を送出する光送信機と、光受信機および、少なくとも一つの光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、各光ファイバ区間の分散量がすべて最小値をとる場合の受信波形の劣化量（アイ開口もしくは波形幅）と、各光ファイバ区間の分散量がすべて最大値をとる場合の受信波形の劣化量が、略一致するように該光分散補償器の分散補償量を設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 10】各区間の分散量が統計的なばらつきを持ち、かつその最大／最小値が定められた一つ以上の光ファイバ伝送区間と、光アンプを用いた 0 個以上の光中継器と、強度変調光を送出する光送信機と、光受信機および、少なくとも一つの光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、各光ファイバ区間の分散量がすべて最小値で、かつ分散補償量を 0 とした場合の伝送可能距離を L とし、また、各光ファイバ区間の分散量がすべて最大値の場合に距離 L だけ伝送可能とする正の分散補償量を C とするとき、該光分散補償器の分散補償量を 0 から C の間に設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項 11】各区間の分散量が統計的なばらつきを持ち、かつその最大／最小値が定められた一つ以上の光ファイバ伝送区間と、光アンプを用いた 0 個以上の光中継器と、強度変調光を送出する光送信機と、光受信機および、伝送路の途中に分散配置された一つ以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、各分散補償器の直後で、該光送信機から該分散補償器間の全光ファイバ区間の分散量がすべて最小値をとる場合の波形劣化量（アイ開口もしくは波形幅）と、該光送信機から該分散補償器間の全光ファイバ区間の分散量がすべて最大値をとる場合の波形劣化量が略一致するように、該各光分散補償器の分散補償量を設定することを特徴とした光伝送シ

テム。

【請求項12】少なくとも、一つ以上の光ファイバ伝送区間、波長が該光ファイバ伝送路の平均の零分散波長に略一致した強度変調光を送出する光送信機、および光受信機を含む光伝送システムにおいて、一個以上の光分散補償器を挿入することを特徴とした光伝送システム。

【請求項13】少なくとも、光ファイバ伝送路、波長が該光ファイバ伝送路の平均の零分散波長に略一致した強度変調光を送出する光送信機、光受信機、および一個以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、該光送信機から距離 z の点 Z における光ファイバ中の光強度を $P(z)$ 、点 Z から該光受信機までの分散量（該光分散補償器の分散量を含む）を $D(z)$ とすると、積 $P(z) \cdot D(z)$ を $z=0$ から L まで積分した値が略、零となるように、光分散補償器の位置及び、分散量を設定することを特徴とした光伝送システム。

【請求項14】光ファイバの分散量が統計的なばらつきを持ち、かつその最大／最小値の規定された一個以上の光ファイバ伝送区間、光アンプを用いた0個以上の光中継器、波長が全伝送区間の平均の零分散波長に一致した強度変調光を送出する光送信機、光受信機、および、少なくとも一つ以上の光分散補償器を含む光伝送システムにおいて、該伝送区間のうち、伝送路の前半部分の伝送区間が最大の分散量を、後半部分が最小の分散量をとる場合と、該伝送区間のうち、伝送路の前半部分の伝送区間が最小の分散量を、後半部分が最大の分散量をとる場合に、受信波形の波形劣化量（アイ開口もしくは波形幅）が略一致するように分散補償量を設定することを特徴とした光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、光ファイバ通信の一方式であるIM（強度変調）方式の光伝送システムにかかわるものである。

【0002】

【従来の技術】近年の光ファイバ通信においては、伝送信号の高速化や、伝送距離の長距離化が急激に進展している。このような超高速／長距離伝送の伝送距離を制限する最も大きな要因は、光ファイバの「分散」である。分散とは、波長の異なる光が光ファイバ中で異なる速度で伝送される現象である。高速で変調された光信号の光スペクトルは異なる波長成分を含み、これらの各波長の成分は分散の影響によりそれぞれ異なった時刻に受信端に到着する。その結果、伝送後の光波形は大きな波形歪を引き起こすことが知られている。このような分散の影響を回避する一手法として、分散補償という手法が考えられている。これは伝送路の途中に伝送路と逆符号の分散特性を持つ媒体（光ファイバやグレーティング）を挿入し、伝送路の平均の分散量がほぼ零となるように補償することにより、伝送後の波形歪を避ける方式である。

【0003】一方、光ファイバ通信の伝送距離を制限する別の要因として、光ファイバの非線形効果が知られている。特に、強度変調方式の光伝送においては、光ファイバの非線形効果の一つである自己位相変調効果（Self Phase Modulation: SPM）が大きな問題となる。SPMとは光信号の強度変化に比例して光ファイバの屈折率変動し、その結果、光信号が光ファイバ中で自分自身に余分な位相変調、すなわち周波数チャープ（光周波数の変動）を重畳してしまう現象である。このような周波数チャープを持った光信号は、光ファイバの持つ分散の影響により伝送後に大きな波形変化を起こす。このようなSPMの影響については、①「Nonlinear Fiber Optics」, Academic Press, 1992, (ISBN 0-12-045140-9)、また、②菊池他、信学技報、OC S 92-52, 電子通信情報学会(1992)等に報告されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】従来、SPMの影響の大きな場合についても、分散補償を実施した例がいくつか報告されているが、従来通り単純に伝送路全体の分散量が零となるように分散補償を行うに過ぎないものであった。また、SPMが分散補償伝送に与える影響もほとんど検討されていない。

【0005】本発明の目的は、SPMの影響を考慮した分散補償方式を有する光伝送システムを提供することにある。

【0006】

【課題を解決するための手段】上記目的は、光送信機から距離 z の点 Z における光ファイバ中の光強度を $P(z)$ 、点 Z から光受信機までの分散量（光分散補償器の分散量を含む）を $D(z)$ とすると、積 $P(z) \cdot D(z)$ を $z=0$ から L まで積分した値が略、零となるように光分散補償器の位置及び、分散量を設定することにより達成できる。

【0007】とくに複数の光分散補償器を用いる場合には、送信側から i 番目の光分散補償器の直後の点を Z_i とし、点 Z から Z_i 間の分散量（光分散補償器の分散量を含む）を $D_i(z)$ とすると、積 $P(z) \cdot D_i(z)$ を $z=0$ から Z_i まで積分した値がすべての i について略、零となるように、各光分散補償器の位置及び、分散量を設定することによって達成できる。

【0008】さらに光分散補償器が光受信機の手前に配置される場合には、該分散補償器の分散量 C を伝送路の分散量 B の略 $\{1/(aL) - (N+1)/(2N)\}$ 倍（ただし a は光ファイバの損失係数、 L は総伝送距離、 N は中継区間数）となるように設定することで達成できる。

【0009】また受信端付近の分散補償器の配置間隔を送信端付近より小さくすることによって達成できる。とくに各分散補償器の直前での波形劣化量が該一致するような位置に分散補償器を配置することによりさらに効果的に達成することができる。また、各中継区間の分散量

や各光中継器の光出力強度がほぼ一定であり、SPMの影響が大きな場合、該光送信機と1番目の分散補償器の間隔を l_1 とすると、 i 番目と $i+1$ 番目の分散補償器の間隔 l_i を l_1 の略 $\sqrt{i} - \sqrt{(i-1)}$ 倍に設定することによって達成できる。

【0010】また光送信機直後と光受信機の直前の2カ所に分散補償器を配置し、最初の分散補償器で光波形幅を、送信光波形幅より充分に拡大してから伝送することによっても達成できる。

【0011】また各中継区間を構成する光ファイバの分散量がある範囲の統計的なばらつきをもつ場合には、伝送路中の分散補償器も含めた総分散量の期待値が正分散（異常分散）となるように分散補償を行うことで達成できる。具体的には、各光ファイバ区間の分散量がすべて最小値で、かつ分散補償量を0とした場合の伝送可能距離を L とし、各光ファイバ区間の分散量がすべて最大値の場合に距離 L だけ伝送可能とする正の分散補償量を C とすると、該光分散補償器の分散補償量を0から C の間に設定することによって達成できる。とくに各光ファイバの分散値がすべて最小値をとる場合と、各光ファイバの分散値がすべて最大値をとるような2つの場合に、伝送後の波形劣化が略一致するように分散補償量を設定することによってもっとも効果的に達成することができる。

【0012】また、伝送路の零分散波長を用いて伝送を行う場合でも、分散補償を行うことによって達成することが可能である。これによって伝送路の分散値の偏りを打ち消すことによって達成できる。例えば、該光送信機から距離 z の点 Z における光ファイバ中の光強度を $P(z)$ 、点 Z から該光受信機までの分散量（該光分散補償器の分散量を含む）を $D(z)$ とすると、積 $P(z) \cdot D(z)$ を $z=0$ から L まで積分した値が略、零となるように、光分散補償器の位置及び、分散量を設定することによって達成できる。また分散値にある範囲の統計的なばらつきがある場合、正分散側の分散補償を行うことによって達成できる。さらに、伝送路の前半部分の伝送区間が最小の分散量を、後半部が最大の分散量をとる場合に受信波形の波形劣化量が略一致するように分散補償量を設定することによって、効果的に達成することが可能である。

【0013】

【作用】SPMによって発生する周波数チャープは、伝送路の全長にわたり分布的に発生し、発生点以降の分散を受けて、波形劣化を引き起こす。伝送路全体で平均するとSPMの発生点の中心は、中継区間数 N が充分大きい場合、ほぼ伝送路の中央付近となる。したがって伝送路の分散量の略半分ほど分散補償することにより、SPMの受ける分散量を等価的に零とすることが可能となる。これにより例えば、光アンプの光出力強度が変化しても、受信波形が変化しないようにすることが可能である。

【0014】またSPMによって生じる周波数チャープは伝送中に累積されるため、伝送路の後半付近の光波形の方が分散の影響によって、容易に波形変化を引き起こす。そこで複数の分散補償器を配置する場合、受信端付近ほど配置間隔を小さくすることにより、分散補償効果を高めることが可能である。またSPMの影響を考慮した分散補償を行う場合、伝送中に波形が大きく変動すると分散補償後にも元の波形を復元することができなくなる。しかしながら、分散補償器の数を必要以上に多くするとコスト面で不利となる。そこで伝送後の波形劣化がある一定量に達するごとに分散補償器を挿入することにより、分散補償器の数を最適化することが可能となる。

【0015】またSPMによる波形劣化は、伝送波形の持つ強度変調成分の大きさに比例しているため、光送信機の直後に分散補償器を挿入し、光波形の幅を送信光波形幅より充分拡大したのちに伝送を行うことにより、SPMの影響を抑圧することが可能となる。

【0016】また各中継区間を構成する光ファイバの分散量がある範囲の統計的なばらつきをもつ場合、通常伝送系の最低伝送距離は伝送路の分散がすべて負分散側にばらついた場合に制限されている。したがって、伝送路の総分散量の期待値が正分散（異常分散）となるように分散補償を行うことで伝送系の最低伝送距離を拡大することが可能になる。特に各光ファイバの分散値がすべて最小値をとる場合と、各光ファイバの分散値がすべて最大値をとるような2つの場合に、伝送後の波形劣化が略一致するように分散補償量を設定することで、伝送系の最低伝送距離を最大にすることができる。

【0017】また、伝送路の零分散波長を用いて伝送を行う場合でも、分散補償によって伝送路の分散値の偏りを打ち消すことで、SPMによる波形劣化を低減し、伝送距離が拡大できる。また分散値にある範囲の統計的なばらつきがある場合でも、正分散側の分散補償により、伝送系の最低伝送距離を拡大することが可能である。

【0018】

【実施例】図1は本発明の第一の実施例を示す構成図である。光送信機100より送出された強度変調光は、光ファイバ101と光アンプを用いた光中継器102を交互に配置した伝送路を伝送される。伝送路の途中にはひとつ又は複数の分散補償器103が配置されており、伝送された光信号は光受信機104で受信される。図は2つの分散補償器103を配置した例である。従来の分散補償伝送においては、各分散補償器の分散補償量 C は、それぞれ直前の分散補償器までの光ファイバ分散量を打ち消し、分散補償器も含めた伝送路の総分散量が零となるように設定する。このような従来の分散補償伝送においてはSPMによる波形劣化の影響は考慮されていない。これに対し本発明においては、送信端から距離 z の点 Z における光ファイバ中の光強度を $P(z)$ 、点 Z から光受信機104までの伝送路の分散量（分散補償器の分散量を

含む)を $D(z)$ とすると、積 $P(z) \cdot D(z)$ を $z=0$ から L まで積分値が略、零となるように C の値と位置を設定する。このようにすることで、光ファイバ中で発生する非線形効果であるSPMの影響を近似的に打ち消した伝送が可能になる。この理由は、以下のように説明できる。

【0019】図2は、光ファイバ伝送路中の光強度分布 $P(z)$ を示した図である。SPMによって光ファイバの途中で発生する周波数チャープの大きさは、光ファイバ中の光強度に比例するため図2のように分布する。これらの周波数チャープが発生点 z から光受信機104間の

$$\int_0^L [P(z) \cdot D(z)] dz = 0$$

【0021】この式の左辺を光ファイバ中の平均光強度で割った値は、SPMによって生じる周波数チャープの平均的な中心(重心点)から受信端までの分散量を表す値となる。(数1)はこの値が0、すなわちSPMによる周波数チャープの受ける平均的な分散量が0となるように補償することを示している。このように分散補償を行うことにより、SPMの影響を近似的に打ち消すことが可能になる。

$$C = \left(\frac{1}{aL} - \frac{N+1}{2N} \right) \cdot B$$

【0024】ただし a は光ファイバの損失係数、 L は総伝送距離、 N は中継区間数である。上式は、光送信機100及び光アンプ102の光出力強度がほぼ等しいとして、数(1)を解いて得られる近似解である。例えば、 $a=0.25\text{dB/km}$ 、 $L=1000\text{km}$ 、 $N=10$ の場合、本実施例における分散補償量は、伝送路の総分散量のおよそ53%(符号は逆)となる。図4に分散補償量をパラメータとした場合の、光アンプの光出力強度に対する受信波形のアイ開口劣化の変化の様子を示す。本計算では、ビットレート5Gbps、総伝送距離 $L=1000\text{km}$ 、 $N=10$ 、光ファイバの分散値 $D=-3.5\text{ps/nm/km}$ と仮定した。図中の3本のグラフは、分散補償無、53%補償(本方式)、及び、100%補償(従来方式)の効果を示している。分散補償を行った2つの例は、分散補償を行わない場合に比べ、光出力強度が大(SPMの影響大)の領域でも伝送後のアイ開口劣化が小さく抑えられていることが確認できる。この図からは、100%補償を行った例の方が53%補償の場合よりアイ開口劣化が小さくなっているように見えるが、これは100%補償の場合にはSPMの影響が打ち消されておらず、SPMの効果によって伝送波形の圧縮が起こっているためである。この様子は、図5に示す受信波形のアイパターンから確認するこ

とができる。分散量 $D(z)$ の影響によって伝送後の波形劣化を引き起こすと考えることができる。前掲の文献②に示す手法に従えば、伝送後の波形劣化は $P(z)$ と $D(z)$ の積を送信端から受信端まで積分した量に比例すると考えられる。したがってこの量がほぼ0となるように分散補償を行うことでSPMによる波形劣化をほぼ0に抑圧することが可能になる。この条件は(数1)のように表記することが可能である。

【0020】

【数1】

(数1)

【0022】図3は本発明の第2の実施例であり、分散補償器103の数が一つで光受信機104の手前に配置される例である。本実施例においては、分散補償器103の分散補償量 C の値は、伝送路の総分散量を B とすると、略(数2)で与えられる。

【0023】

【数2】

(数2)

とができる。i)は従来方式の100%補償の例であり、(a)、(b)はそれぞれ光出力強度-3dBmと+3dBmにおける受信波形のアイパターンであり、光出力が大となると大きな波形圧縮が起こり、受信波形が大きく変化していることが確認できる。これに対し、本方式であるii)53%補償の例では、SPMの影響が近似的に打ち消されているため、光強度を変化させた場合にも受信波形は殆ど変化していないことが確認できる。このように、本方式では光出力強度を変化させても受信波形が変化しないため、光受信機の識別レベルの設定が容易で、また受信波形の位相マージンも大きくなるという利点がある。図6に分散補償量と伝送波形の位相マージンの関係を示す。位相マージンは本方式の分散補償量53%の付近で最大となっていることが確認できる。また本発明は、およそ分散補償量20%から80%の範囲で有効であることが確認できる。

【0025】また、特に各中継区間の分散値や区間長等が一定でない場合には、必要な分散補償量は、(数3)から計算できる。

【0026】

【数3】

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot \{D_i / a - (D_i \cdot l_i + \dots + D_N \cdot l_N)\}}{\sum_{i=1}^N P_i} \cdot B \quad (\text{数 } 3)$$

【0027】式中、 P_i は送信側から数えて i 番目のファイバ区間に入力される光強度、 D_i および L_i は i 番目の区間のファイバの分散値及び区間長である。

【0028】また、図7は本発明の第3の実施例であり、複数の分散補償器104を伝送路中に分散配置した例である。この場合、各分散補償器はその直後でそれぞれ、上記SPMがキャンセルされる条件が成立するように設定するのが最も効果的である。すなわち、分散補償器の個数を M 、光送信機100から数えて i 番目の分散補償器の位置（送信端からの距離）を z_i 、補償量を C_i 、また、送信端から距離 z の点 Z における光ファイバ中の光強度を $P(z)$ 、点 Z から点 z_i 間の分散量を $D_i(z)$ とすると、積 $P(z) \cdot D_i(z)$ を $z=0$ から z_i まで積分した値がすべての i について略、零となるように C_i の値と位置を設定する。このようにすることで、光ファイバ中で発生する非線形効果であるSPMの影響を近似的に打ち消した伝送が可能になる。

【0029】本発明で用いる分散補償器としては、分散特性を持つ光素子であれば何でも使用可能である。このような光素子の例としては、グレーティングペアやグレーティングによる反射を用いた光素子、ファブリーペロー、マッハツェンダ干渉計等を用いた光素子、光半導体の吸収端の分散特性等を用いた素子などがある。また、伝送路と逆の分散特性を持った光ファイバを分散補償素子として用いることも可能である。特に1.55 μm を伝送波長とする場合、1.3 μm 等に零分散波長を持つ光ファイバを分散補償ファイバとして用いるのが有効である。本発明の第4の実施例（図8）、第5の実施例

（図9）は、分散補償ファイバ105自体を伝送路や中継区間の一部もしくは全体の構成要素として用いた例である。本方式は、分散補償ファイバ内部のSPMの影響が無視できない場合にも有効であり、上記と同一の方法で分散補償量を計算することができる。

【0030】図10は本発明の第6の実施例であり、分散補償器の最適な配置法を示している。図は3つの分散補償器を配置した例である。本図では光中継器は省略されている。従来の手法では、分散補償器の間隔は一定とするものと考えられていた。しかしながら本実施例では光送信機から1番目の分散補償器までの間隔を l_1 、1番目と2番目の分散補償器の間隔を l_2 、2番目と3番目の分散補償器の間隔を l_3 と定義し、 $l_1 \geq l_2 \geq l_3$ となるように分散補償器106、107、108を配置している。この理由は、例えば各分散補償器で伝送後の波形劣化が零となるように分散補償をした場合を考えて

も、波形劣化は補償できても、SPMによる周波数チャープは消去できずに伝送中に積算されていく。したがって、受信端ほど分散補償器の間隔を密にすることで、必要な分散補償器の数を減らすことができる。この場合、各分散補償器の補償量は直前の伝送ファイバ区間の分散量を100%補償するようにも、また本発明の前記の実施例のようにSPMの影響をキャンセルするようにも設定することができる。

【0031】分散補償器の数を最適化する場合には、各分散補償器の直前での波形劣化量が該一致するように分散補償器を配置するのが最も適当である。すなわち、光ファイバ伝送路中の波形劣化量が所定の値となった距離で最初の分散補償器を配置して波形劣化を回復し、その後再び所定の値に達した点で次の分散補償器を挿入することを繰り返すことで、分散補償器の数を一定としたとき最長の伝送距離を得ることが可能である。波形劣化量の評価法としては、例えば受信波形の幅が10%広がった点や、アイ開口劣化量が1dBとなる点とすることができる。特にSPMによる波形劣化が伝送距離を制限する場合、 i 番目の分散補償器の間隔 l_i を l_1 の該 $\sqrt{i-1}$ に設定することで配置を最適化できる。

【0032】図11は本発明の第7の実施例であり、最初のうちはほぼ分散補償器をほぼ等間隔に配置し、途中から分散補償器の間隔を小さく配置した例である。ファイバ伝送路の始めの部分では波形劣化は、SPMよりむしろ分散によって発生するので分散補償器をほぼ等間隔に、SPMの影響が大きくなってからは間隔を小さく配置している。なお、実際の分散補償器の配置位置は、光中継器の位置や中継間隔によって、ある程度前後する可能性がある。

【0033】また、従来より伝送路のファイバをわずかに正常分散とし、周期的に異常分散のファイバによって分散補償を行うことで、伝送路の波形劣化と4光波混合等の非線形効果をともに抑圧して伝送する方式が提案されている。本発明における分散補償器の配置法は、このような分散補償伝送における分散補償ファイバの配置にも適用することが可能である。

【0034】図12は本発明の第8の実施例を示す構成図である。本実施例では、光送信機100直後と光受信機104の直前の2カ所に、それぞれ分散補償器106、107が配置されている。分散補償器106は伝送される光波形に大きな分散を与え、光波形を充分に変形させ、強度変化を低減させたのちに伝送ファイバに入力する効果を持っている。このため、伝送波形に対するS

P Mの影響を大きく低減させることが可能である。本手法では、例えば送信波形の幅を1.5倍以上に拡大して送信することによってS P Mの抑圧効果が得られる。受信端では、分散補償器107によって分散補償器106、もしくは分散補償器106と伝送路の分散量を補償してから受信することにより、送信波形を回復することが可能となる。これらの分散補償器は伝送路中にいくつかに分割し、分散配置することも可能である。

【0035】図13は本発明の第9の実施例を示す構成図である。本実施例においては、各中継区間を構成する光ファイバ110, 111, 112の分散量はある範囲のばらつきをもつものと仮定している。従来の分散補償伝送においては、光ファイバの分散量のばらつきの影響はまったく考慮していない。分散補償を行わない場合、このような伝送系ではすべての光ファイバの分散値が最小（負分散側）となったときの伝送距離が最低伝送距離となってしまう。これに対し、本手法で伝送路中の分散補償器も含めた総分散量の期待値が正分散（異常分散）となるように分散補償を行う。これにより伝送後の波形が圧縮方向の波形歪をうけるため、最低伝送距離を拡大することが可能になる。伝送路の平均分散値がたまたま正分散（異常分散）側にある場合には、該分散補償により伝送距離は逆に短くなってしまうこともありうるが、この値が伝送路の最低伝送距離以上であれば問題はない。このような分散補償量の最適値は、各光ファイバの分散値がすべて最小値をとる場合と、各光ファイバの分散値がすべて最大値をとるような2つの場合で、伝送後の波形劣化が略一致するような値である。このとき、最低伝送距離を最大とすることが可能となる。

【0036】図14は本発明の第10の実施例であり、とくに光受信機104の手前にひとつだけ分散補償器106を配置した例である。図15は分散補償器106の分散量を変化させたとき伝送可能距離の変化を示したものである。計算では、ビットレート5Gbps、中継間隔1=100km、光ファイバの分散値は $|D| \leq 3.5 \text{ ps/nm/km}$ の範囲でばらつきを持つものと仮定し、また伝送限界は伝送後の波形が約25%広がった点と定義した。図中の2本の線は光ファイバがすべて -3.5 ps/nm/km の分散値を持つ場合と、すべて $+3.5 \text{ ps/nm/km}$ の分散値を持つ場合の伝送限界であり、他の場合はすべて、このどちらかの場合より伝送可能距離が長くなる。したがって両線より下の領域が、ファイバの分散値がどのようにばらついていても伝送を保証できる距離となる。図から、分散補償を行わない場合には最低伝送距離は約700kmであるが、異常分散側（図では右側）に分散補償を行うことにより、最短伝送距離が長くなることが確認できる。特に両線が交わる（図15では2000ps/nm付近）に分散補償量を設定することで、最低伝送距離を最も長くすることができる。これはちょうど、各光ファイバの分散値がすべて最小値をとる場合と、各光ファイバの分散値が

すべて最大値をとるような2つの場合で、伝送後の波形劣化が略一致するような分散補償量である。

【0037】また特に各光ファイバ区間の分散量がすべて最小値（負分散もしくは正常分散側）で、かつ分散補償量を0とした場合の伝送可能距離をL（図15では700km）とし、また、各光ファイバ区間の分散量がすべて最大値の場合に距離Lだけ伝送可能とする正の分散補償量をC（図1では約3500ps/nm）とすると、該光分散補償器の分散補償量を0からCの間に設定することで最低伝送距離を拡大することが可能になる。

【0038】また、図13のように多数の分散補償器が含まれる場合には、各分散補償器の分散補償量は以下のように決定することができる。すなわち、各分散補償器の直後で、光送信機100から該分散補償器までの全光ファイバ区間の分散量がすべて最小値をとる場合の波形劣化量と、該分散量がすべて最大値をとる場合の波形劣化量が略一致するように、該分散補償器の分散補償量Cが決定できる。光送信機100に近い側の分散補償器から順に上記のように補償量Cを決定することですべての補償量が矛盾無く定まり、またこのとき最低伝送距離を最長とすることができる。分散補償器の配置は等間隔でも、また前記のように受信端に近いほど間隔小とするような不等間隔配置としても構わない。

【0039】また、光ファイバ伝送においては伝送路の分散値が平均的に0になる零分散波長を選んで伝送をおこなう、零分散波長伝送という方式も検討されている。このような零分散波長伝送においては、従来分散補償を行うことは考慮されていない。この理由は、従来零分散波長を用いて伝送を行うことによって受信波形の劣化を無くすことができると考えられていたからである。これに対し、文献③菊池他、信学技報、OCS93-24、電子通信情報学会（1993）においては、伝送路の分散値にばらつきがある場合にはS P Mの影響によって受信波形に大きな劣化が生じることが示されている。このような波形劣化は伝送路の分散値の偏りによって生じるため、分散補償器を挿入することにより打ち消すことが可能となる。分散補償器の補償量は前記（数1）を満たす値が最も適切であるが、0から（数1）の値の2倍程度の範囲で効果がある。

【0040】上記零分散波長伝送において、光ファイバの分散量がある範囲でばらつきを持つ場合でも、分散補償を用いることによって最低伝送距離を拡大することができる。零分散波長伝送の場合には、図16のように、a)伝送路の前半部分の伝送区間が最大の分散量を、後半部分が最小の分散量をとる場合と、b)伝送路の前半部分の伝送区間が最小の分散量を、後半部分が最大の分散量をとる場合の2つが最悪の分散配置であり、他の場合には少なくともa), b)いずれかよりは伝送距離が長くなる。したがってa), b)の2つの場合の伝送距離、もしくは伝送後の波形劣化が等しくなるように分散補償器106の

補償量を設定することにより、最低伝送距離を最大にすることができる。本方式においても、複数の分散補償器を用いることが可能である。

【0041】

【発明の効果】分散補償器の分散補償量を（数1）を満たすように設定することにより、SPMの影響がキャンセルできるので、光出力強度を変化させても受信波形が変化せず、光受信機の識別レベルの設定が容易になり、また受信波形の位相マージンも大きくなるという効果がある。また、SPMの効果を無視できるため伝送系の設計が容易となるという効果もある。

【0042】また受信端付近の分散補償器の配置間隔を送信端付近より小さくすることにより、伝送中に積算されたSPMによって生じる受信端付近の波形劣化を効率良く補償することができるので、伝送距離を拡大する効果がある。さらに各分散補償器の直前での波形劣化量が該一致するような位置に分散補償器を配置することにより、必要な分散補償器の数を最小とする効果がある。

【0043】また光送信機直後と光受信機の直前の2カ所に分散補償器を配置し、最初の分散補償器で光波形を充分に変形させてから伝送することにより、伝送波形の強度変化を低減させることができるので、SPMの影響を低減する効果がある。

【0044】また各中継区間を構成する光ファイバの分散量がある範囲のばらつきをもつ場合には、伝送路中の分散補償器も含めた総分散量の期待値が正分散（異常分散）となるように分散補償を行う。通常伝送路の最低伝送距離は伝送路の分散がすべて負分散側にばらついた場合に制限されているので、正分散側の分散補償により伝送系の最低伝送距離を拡大することが可能になる。特に各光ファイバの分散値がすべて最小値をとる場合と、各光ファイバの分散値がすべて最大値をとるような2つの場合に、伝送後の波形劣化が略一致するように分散補償量を設定することで、伝送系の最低伝送距離を最大にする効果がある。

【0045】また、伝送路の零分散波長を用いて伝送を行う場合でも、分散補償によって伝送路の分散値の偏りを打ち消すことで、SPMによる波形劣化を低減し、伝送距離を拡大する効果がある。また分散値にある範囲のばらつきがある場合でも、正分散側の分散補償により、伝送系の最低伝送距離を拡大する効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施例を示す構成図である。

【図2】光ファイバ伝送路中の光強度分布を示す図である。

【図3】本発明の第2の実施例を示す構成図である。

【図4】光アンプの光出力と受信波形のアイ開口劣化の関係を示す図である。

【図5】受信波形のアイパターンを示す図である。

【図6】分散補償量と受信波形の位相マージンの関係を示す図である。

【図7】本発明の第3の実施例を示す構成図である。

【図8】本発明の第4の実施例を示す構成図である。

【図9】本発明の第5の実施例を示す構成図である。

【図10】本発明の第6の実施例を示す構成図である。

【図11】本発明の第7の実施例を示す構成図である。

【図12】本発明の第8の実施例を示す構成図である。

【図13】本発明の第9の実施例を示す構成図である。

【図14】本発明の第10の実施例を示す構成図である。

【図15】分散補償量と伝送距離の関係を示す図である。

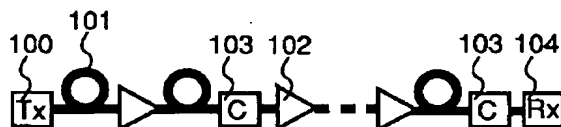
【図16】零分散波長伝送における最悪の分散配置を示す図である。

【符号の説明】

100…光送信機、101…光ファイバ、102…光増幅器、103…光分散補償器、104…光受信機、105…分散補償ファイバ、106, 107, 108, 109…光分散補償器、110, 111, 112…光ファイバ。

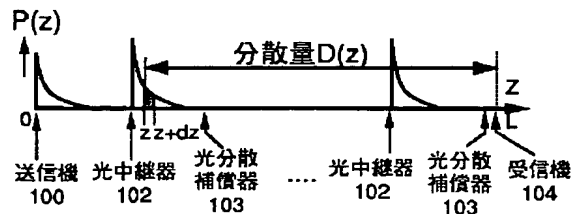
【図1】

図1

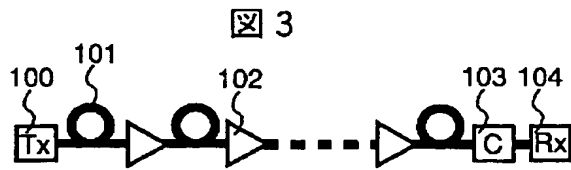


【図2】

図2



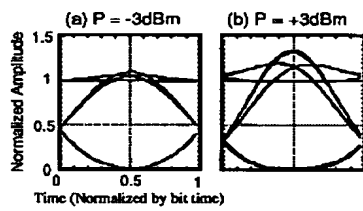
【図 3】



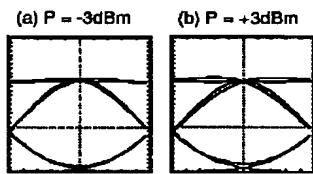
【図 5】

図 5

i) 従来方式(100%補償)

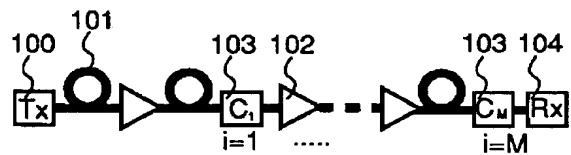


ii) 本方式(53%補償)



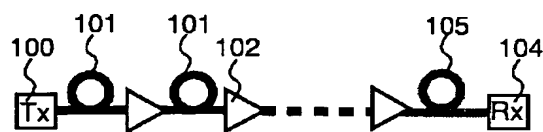
【図 7】

図 7



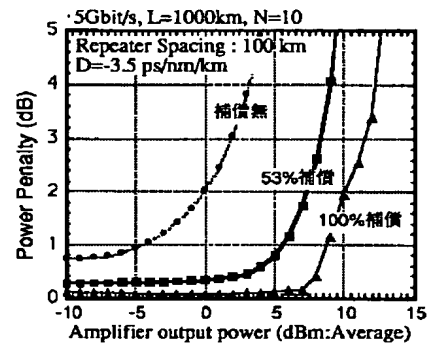
【図 9】

図 9



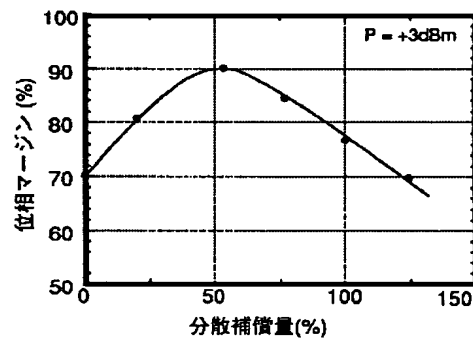
【図 4】

図 4



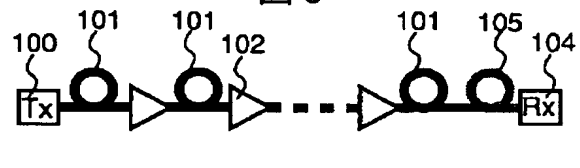
【図 6】

図 6



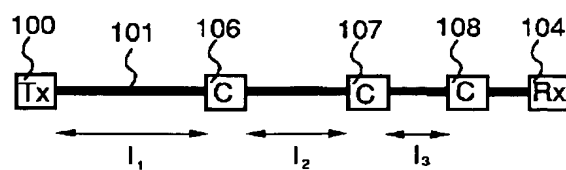
【図 8】

図 8



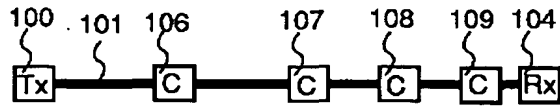
【図 10】

図 10



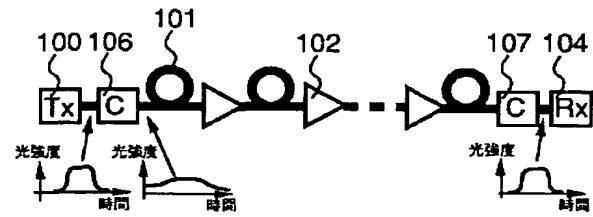
【図 1 1】

図 1 1



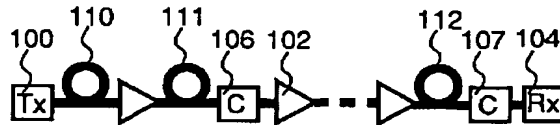
【図 1 2】

図 1 2



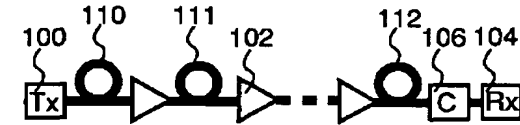
【図 1 3】

図 1 3



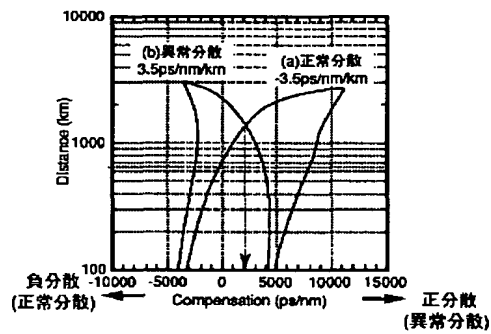
【図 1 4】

図 1 4



【図 1 5】

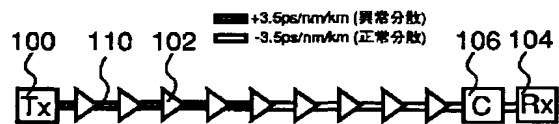
図 1 5



【図 1 6】

図 1 6

a)前半が最大、後半が最小の分散量の場合



b)前半が最小、後半が最大の分散量の場合

